

変態超塑性の動的粘弾性挙動について

西 原 公*

On the Dynamic Viscoelastic Behavior under Transformation Superplasticity

By Tadashi Nishihara

Synopsis: The internal friction during rapid heating transformation in pure iron and eutectoid steel has been examined, using an originally designed apparatus for measuring dynamic viscoelastic deformation. The main results obtained are as follows:

- (1) The peak of internal friction was observed at the temperature of initiation of rapid heating transformation.
- (2) The decrease of internal friction with the increase of dynamic modulus, depended on the heating rate, was observed during phase transformation.

要旨: 純鉄及び共析鋼の急速加熱変態時の内部摩擦変化を試作せる動的粘弾性測定装置により調べ、以下の結果を得た。

- (1) 各材料とも急速加熱変態開始時に異常な内部摩擦の増加を示した。
- (2) 変態進行時には内部摩擦の低下と動的弾性率の増加が見られ、ともに加熱速度に依存した。

I. 緒 言

変態超塑性は作用応力下において繰返し熱サイクルを与えて相変態を進行させると、材料自身の持つ塑性流動応力よりもはるかに小さい応力によってネックを生じることなしに巨大伸びが得られる現象である。従来この変態超塑性の研究においては、その変形挙動の詳細を知るためにクリープ及び応力緩和等による静的粘弾性測定手法が主に用いられ、その特性が論じられてきた¹⁾²⁾。しかしながら、これらの手法によっては変態超塑性変形とその形状記憶効果³⁾及び緩和現象³⁾との相互関係等を明確にすることはむずかしい。すなわち、変態超塑性現象の詳細を知るには変態進行時における弾性的成分と粘性的成分の分離及び粘弾性的性質の連続的变化を知ることが重要であり、これは動的粘弾性の手法の導入により実現されると期待される。

そこで著者は急速加熱変態時の動的粘弾性特性が測定可能な非共振低周波ねじり振動法による専用装置の開発を試み、二、三の結果を得ることができた。

本報においては純鉄及び共析鋼の急速加熱変態時の内部摩擦変化と変態超塑性変形との相互関係について論じることとする。

II. 実験装置及び方法

供試材は市販純鉄及び共析成分に近い SK 5 材であり、その化学組成を Table 1 に示す、本実験に用いた試片形状及び寸法は Fig. 1 に示すように平行部長さ 30 mm、直径 4 mm の中実丸棒とした。

Table 1 Chemical composition of specimens (wt%)

	C	Si	Mn	P	S
Iron	0.017	0.036	0.18	0.014	0.01
SK 5	0.90	0.31	0.45	0.002	0.009

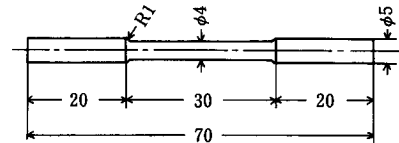


Fig. 1 Test specimen

試作せる非共振低周波ねじり振動法による動的粘弾性測定装置の概略を Fig. 2 に示す。本装置は大別して(1)熱サイクル制御装置、(2)強制変位負荷装置、及び(3)記録部より構成されており、試片に与える強制正弦変位と伝達されるトルクとを比較することにより動的粘弾性的性質が測定される。

* 機械工学科 講師
Instructor, Mechanical Engineering Division.

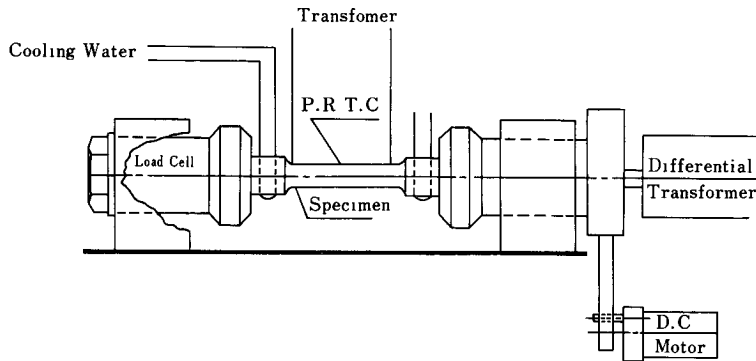


Fig. 2 Schematic diagram of test apparatus

加熱は 10 KVA 容量のトランスによる直接抵抗加熱方式とし、試料の温度をフィードバックし、熱サイクル制御装置により任意の熱サイクル及び恒温保持を制御することが可能である。温度は試片にスポット溶接した直径 0.3 mm の P.R. 熱電対により測定される。

強制変位負荷装置は試片にモータのロコモーション運動をねじりとして与え、1 度以内のねじれ角で 0.01~10 Hz の正弦波を与えることができる。また回転角度計によりその波形が測定される。伝達されるトルクは試片に直列に接続されたロードセルにより測定される。さらに

ひずみ振幅を一定にするために、ロードセルと試片との剛性比は室温において 50 倍以上とした。

III. 実験結果及び考察

非共振ねじり振動法による測定結果のチャートの一例を Fig. 3 に示す。

市販純鉄にひずみ振幅 1.0×10^{-3} の強制正弦ねじり変位を連続的に与え、室温~1100°C~室温の熱サイクルを負荷すると図に示されるように加熱時は 500°C 付近よりトルクが低下し始め、特に 920°C 近傍の Ac_3 変態温

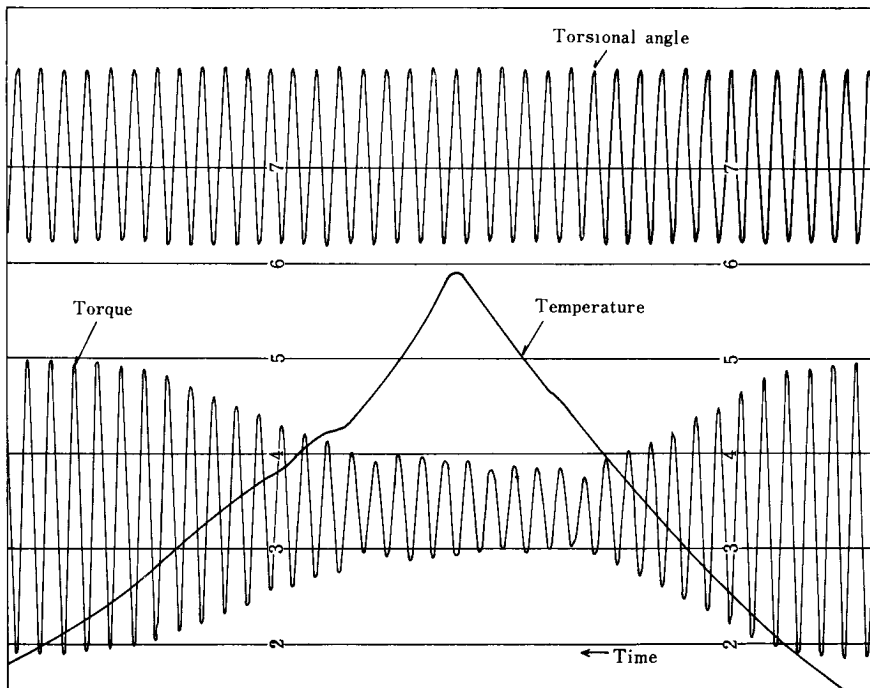


Fig. 3 Typical curves of temperature-time, torque-time and torsional angle-time data for pure iron undergoing phase transformation

度付近において急激に減少し、回復の後若干低下する。冷却時においては Ar_3 変態温度付近において急激に減少し、その後回復する。

これらのトルクの変動及び強制変位より試片の複素弾性率が求められる。すなわち位相差法⁴⁾⁵⁾により動的弾性率及び損失正接等が求められる。実験結果より動的弾性率及び損失正接と温度との関係を純鉄及び共析鋼についてそれぞれ Fig. 4, 5 に示す。図には加熱速度別に示してある。また周波数は 4.0 Hz 一定とした。

Fig. 4 の純鉄の場合、室温から温度を上昇して行くと、例えば加熱速度 $30^\circ\text{C}/\text{sec}$ の場合、動的弾性率 G' は 500°C 付近より急激に減少し始め、 Ac_3 変態開始点近傍の 920°C 付近 a 点でその傾きを反転し、その後 1000°C 付近でピーク b をとり以後減少する。また加熱速度が増大すると a 点における G' の値が若干増大する。さらに b 点は $b-b'-b''$ と急激に大きな値をとる傾向に

あり、その温度も高温側に移行してることがわかる。

これらの動的弾性率 G' の変化に対応して損失正接 $\tan \delta$ にも変化が見られる。すなわち、温度の上昇とともに $\tan \delta$ は 500°C 付近より増大し始め 920°C 近傍で鋭いピークをとり以後フラット部を経て増大する。特に加熱速度が増大するとフラット部が拡大される傾向にある。

A_1 変態のみを持つ共析鋼の場合には純鉄と異なることが Fig. 5 に示される。例えば加熱速度 $30^\circ\text{C}/\text{sec}$ の場合、動的弾性率 G' は Ac_1 変態開始点付近の 720°C (c 点) で傾きが反転する傾向にある。さらに加熱速度が増大すると c 点は $c-c'-c''$ と高温側に移行する傾向にある。しかしながら c 点以後のピーク部は Fig. 4 の純鉄の場合ほど明らかではない。また図の下部に示されるように損失正接 $\tan \delta$ も c, c', c'' に対応してピークをとりフラット部を経た後急激に増大することがわかる。

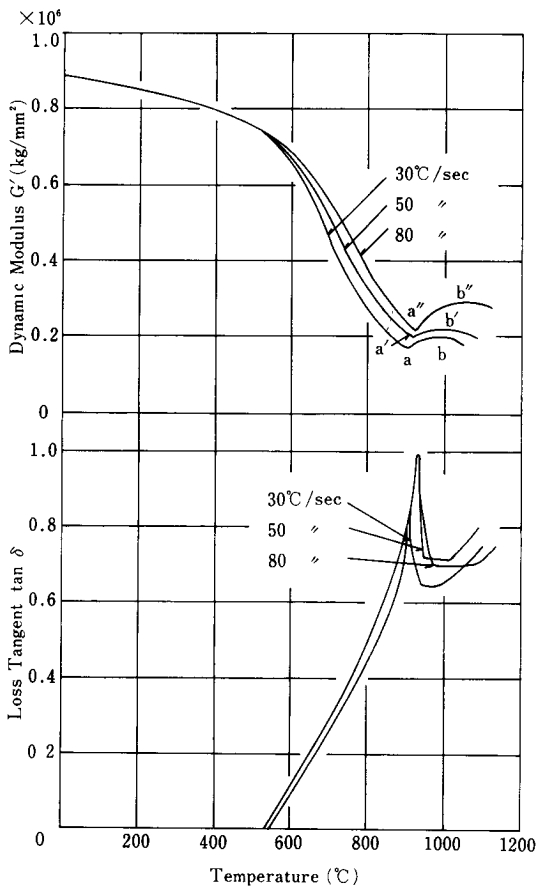


Fig. 4 Relation between temperature and complex modulus (dynamic modulus G' and loss tangent $\tan \delta$) at various heating rates. (Pure Iron) $f=4.0$ Hz

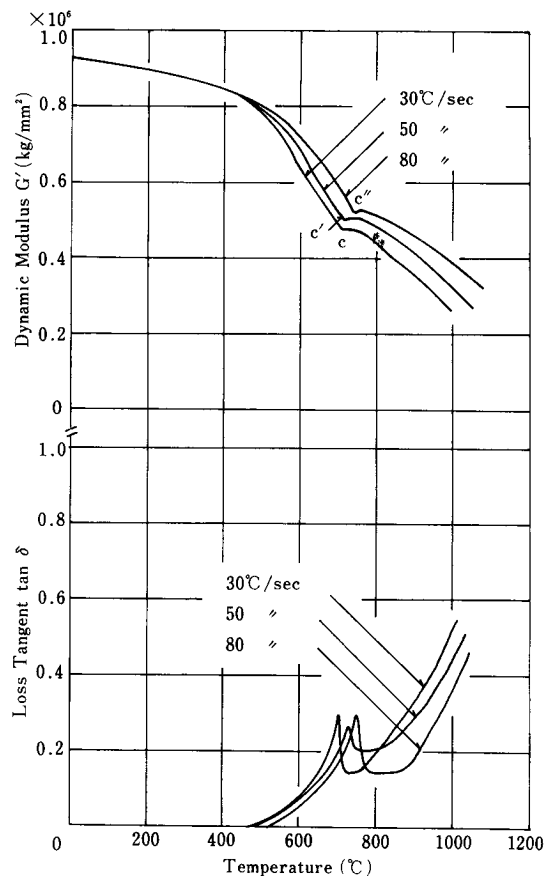


Fig. 5 Relation between temperature and complex modulus (dynamic modulus G' and loss tangent $\tan \delta$) at various heating rates. (SK 5) $f=4.0$ Hz

さらに共析鋼の場合は純鉄に比較して特に変態開始点付近において動的弾性率 G' が大きく、また逆に損失正接 $\tan \delta$ は小さいことがわかる。

純鉄における a, a', a'' 点及び共析鋼における c, c', c'' 点は従来の急速加熱変態における Ac_3 及び Ac_1 変態開始点とほぼ一致しており⁶⁾⁷⁾、また変態超塑性発生温度区間における最大ひずみ速度を示す温度と一致している⁸⁾。さらに上述の損失正接 $\tan \delta$ は材料の内部摩擦すなわち粘性に寄与する量に比例するものである。従って変態開始時には弾性成分の低下と粘性成分の増加が生じ、変態進行時には逆に弾性成分の増加と粘性成分の低下が存在することが考えられる。

このことは変態超塑性変形成分のうち従来までのように粘性のみを考慮すれば良いのではなく、弾性成分を加味して考えなければならぬことを示すのみではなくさらに重要なことを示している。すなわち、動的弾性率 G' が温度に対して正の傾きを持つということはエネルギー弾性のみならずエントロピー弾性が存在し、その寄与が大きいことを示している⁹⁾。従って、変態進行時には高分子材料のゴム弾性のようなエントロピー弾性が存在することが考えられる。一般に高分子の弾性は2次転移点で低下し、より高温側ではゴム弾性を示すことが知られているが¹⁰⁾¹¹⁾、鋼の急速加熱変態開始から進行時において見かけ上高分子的な挙動を示すことは興味深いことである。

以上示したように、急速加熱変態開始から進行時にかけて異常な緩和機構が存在することが考えられる。しかしながら、上述のことをさらに詳細に検討するには観測時間のスケールを変化した遅延時間及び緩和時間の変態

進行時における連続的な変化を知る必要があろう。

IV. 結 言

純鉄及び共析鋼の急速加熱変態時における動的粘弾性特性を試作せる非共振低周波ねじり振動法による動的粘弾性測定装置により調べ、変態超塑性変形との関係を比較検討し以下の結果を得た。

(1) 純鉄、共析鋼ともに急速加熱変態開始時に異常な内部摩擦の増加を示した。

(2) また変態進行時には内部摩擦の低下とそれに対応する動的弾性率の上昇が見られ、ともに加熱速度に依存した。

終りに本研究の遂行にあたって御指導を賜った早稲田大学理工学部教授井口信洋博士、中根金作博士に対し深く感謝の意を表する。

(原稿受付 昭和54年9月25日)

参 考 文 献

- 1) たとえば、西原、浅見、井口・金属学会誌, **41** (1977), 188.
- 2) 西原、高瀬・金属学会誌, **41** (1977), 752.
- 3) 西原、井口・金属学会誌, **40** (1976), 51.
- 4) 中川、神戸: レオロジー, みすず書房 (1970), 534.
- 5) 後藤、平井: レオロジーとその応用, 共立出版 (1975), 130.
- 6) 井口、横田: 金属学会誌, **39** (1975), 19.
- 7) 三輪、井口、横田・金属学会誌, **39** (1975), 24.
- 8) 西原、浅見、相田、井口: 塑性と加工, **16** (1975), 975.
- 9) 中川: レオロジー, 岩波書店 (1970), 51.
- 10) L. E. Nielsen: Mechanical Properties of Polymers, 小野木訳, 高分子の力学的性質, 化学同人 (1974), 155.
- 11) 小野木: 高分子材料科学, 誠文堂新光社 (1973), 104.